

Aus dem Institut für Physiologie und Biokybernetik
der Universität Erlangen - Nürnberg

Direktor: Professor Dr. med. Wolf D. Keidel

VERSTÄNDNIS FREQUENZTRANSPONIERTER SPRACHE BEI NORMAL- UND SCHWERHÖRIGEN

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen - Nürnberg

vorgelegt von
Emil Rudolf
aus Dorfen / Oberbayern

1979
1

1979 # 357

Aus dem Institut für Physiologie und Biokybernetik
der Universität Erlangen-Nürnberg

Direktor: Professor Dr. med. Wolf D. Keidel

VERSTÄNDNIS FREQUENZTRANSPONIERTER SPRACHE BEI NORMAL- UND SCHWERHÖRIGEN

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen - Nürnberg

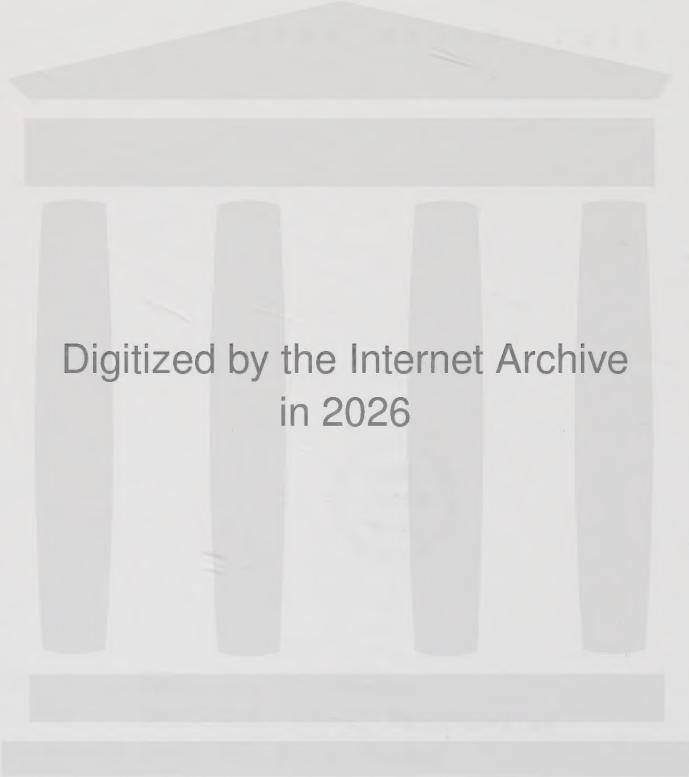
vorgelegt von
Emil Rudolf
aus Dorfen/Oberbayern

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg



Dekan: Prof. Dr. W. Kersten
Referent: Priv.-Doz. Dr. P. Finkenzeller
Korreferent: Prof. Dr. W.-D. Keidel
Tag der mündlichen Prüfung: 12.11.1979

Für I r m i, E d i t h, K a r i n



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546213_0064

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	2
Einleitung	3
Theoretischer Teil	
Frequenzdiskrimination	7
Frequenzdiskriminationsvermögen bei Normalhörenden	7
Frequenzdiskriminationsvermögen bei Gehörgeschädigten	10
Amplitudendiskrimination	13
Amplitudendiskriminationsvermögen bei Normalhörenden	13
Problematik der Hörschwelle	14
Amplitudendiskriminationsvermögen bei Gehörgeschädigten	16
Einfluß der Lautstärke	18
Auf Frequenzdiskrimination	18
Auf Amplitudendiskrimination	19
Auf Wortverständlichkeit	20
Problematik der Segmentierung	23
Einfluß der Anklingzeit auf Lautheit und Schwelle eines Tones	23
Mindestdauer eines Lautes zur Erkennung	26
Experimenteller Teil	
Auswahl des Tests und der Segmentzeit	29
Versuchsaufbau und Durchführung	31
Technische Geräte	31
Lautstärken- und Filtereinstellung	32
Ergebnisse bei normalhörenden Versuchspersonen	34
Vergleich mit anderen Autoren	36
Diskussion der Ergebnisse	38
Fehlerhäufigkeit	38
Verwechslungsmatrices	39
Ergebnisse bei gehörgeschädigten Versuchspersonen	44
Vergleich mit anderen Autoren	44
Diskussion der Ergebnisse	45
Abschließende Betrachtung	47
Literaturhinweise	49

Z u s a m m e n f a s s u n g

Nach einer theoretischen Abhandlung, die sich vor allem mit dem Problem des Frequenz- und Amplitudenunterscheidungsvermögens bei tiefen Frequenzen sowie bei kurzen Anklingzeiten beschäftigt, wird über Ergebnisse mit transponierter Sprache bei Normalhörenden und Gehörgeschädigten berichtet. Als erster Parameter wird das Frequenzdiskriminationsvermögen untersucht. Abhängig von verschiedenen Autoren findet man ab einer bestimmten Tonhöhe ein konstantes Δf , d.h. das Weber-Fechnersche Gesetz verliert ab dieser Grenztonhöhe seine Gültigkeit. Diese Tatsache gewinnt umso mehr an Gewicht, als die durch die Untersetzung erfolgte "Verdichtung" der Frequenzen ein verbessertes Frequenzunterscheidungsvermögen erfordern würde. Bei Gehörgeschädigten war Δf über alle Frequenzen wesentlich größer als bei Normalhörenden, verbesserte sich jedoch relativ bei den tiefen Tönen, ohne allerdings das Auflösungsvermögen des gesunden Ohres zu erreichen. Das Amplitudendiskriminationsvermögen zeigt ebenfalls Abhängigkeit von der Tonhöhe und nimmt mit dieser ab.

Durch die Frequenztransposition erfolgt eine Verschiebung der Sprache in den Bereich stark abfallender Hörschwelle. Folge ist eine Veränderung der Lautstärkepegel untereinander, die durch Filterung beim Normalhörenden ausgeglichen werden muß, während Gehörlose nicht diesen Hörschwellenabfall aufweisen und keiner Korrektur bedürfen. Dieser Vorteil kann von den Gehörgeschädigten genutzt werden, da man im Tiefenbereich von einem weitgehend normalen Amplitudenunterscheidungsvermögen ausgehen kann.

Des weiteren wurde der Einfluß der Lautstärke auf Frequenz- und Amplitudendiskriminationsvermögen diskutiert. Es zeigt sich ein Abfall beider Leistungen bei geringer Intensität. Für Δf wird eine Grenzlautstärke angegeben, über die hinaus eine Erhöhung der Intensität keinen Diskriminationsgewinn mehr bringt. Dieser Wert liegt je nach Autor zwischen 20 und 40 dB. Für ΔI findet sich ein solcher Grenzwert nicht.

Bei Untersuchung mit Sprache zeigt sich ebenfalls starke Abhängigkeit der Verständlichkeit von der Lautstärke bis zu einem Grenzwert von 40-50 dB. Bei untergesetzter Sprache ist der Einfluß der Intensität noch größer und nimmt mit stärker werdender Untersetzung zu.

Die in unseren Versuchen vorgenommene Segmentierung erfordert eine Betrachtung dieser Problematik. Es zeigt sich, daß mit zunehmender Anklingzeit die Lautheit eines Tones abnimmt, kurzdauernde Töne also leiser gehört werden als länger dauernde gleicher Intensität. Diese Erscheinung tritt ab ca. 200 ms auf, ist bei Gehörgeschädigten absolut stärker ausgeprägt und nimmt bei letzteren im Hochtonbereich weiter zu. Relativ gesehen ist der Einfluß der Tondauer auf Δf jedoch geringer als bei Normalhörenden.

Daneben findet sich eine verminderte Verarbeitungskapazität des Ohres bei kurzen Tönen, die vor allem im tiefen Frequenzspektrum deutlich wird. Untersuchungen weisen darauf hin, daß dieser Effekt bei Hörgeschädigten stärker ausgeprägt ist.

Die Versuche werden mit dem Freiburger Zahlentest, der mittels Kopfhörer den in schallgedämpften Kammern sitzenden Versuchspersonen überspielt wurde, durchgeführt. Die normalhörenden Versuchspersonen bekamen gefiltertes Testmaterial überspielt, wobei versucht wurde, die Filtercharakteristik, d.h. den Frequenzgang, dem Hörverlust der Schwerhörigen anzugleichen, während den Gehörgeschädigten die Testreihen mit einer Verstärkung ohne Filterung angeboten wurden. Wurden die sehr tiefen, informationsarmen Frequenzen (bei Filtereinstellung von $2 \times 40 - 100 \text{ Hz} = 48 \text{ dB./oct.}$ bzw. $40 - 300 \text{ Hz}$ und $20 - 600 \text{ Hz}$) mit überspielt, waren die Ergebnisse mit Untersetzung (2:1) schlechter als bei einer Verstärkung mit gleicher Filtereinstellung. Bei Abfilterung der auch subjektiv störenden, tiefen Frequenzbänder ($2 \times 80 - 300 \text{ Hz}$) wurden mit Untersetzung bessere Ergebnisse erzielt. Diese Verbesserung läßt sich auch qualitativ anhand der

Verwechslungsmatrices nachweisen.

Bei der gehörgeschädigten Versuchsperson fanden wir bessere Verständlichkeit mit untersetztem (2:1) Zahlenmaterial.

Eine qualitative Betrachtung der Fehler zeigt, daß die Verwechslungen zufälliger erfolgten als bei normalhörenden Versuchspersonen, was durch fehlende Erfahrung erklärt wird.

Einleitung

Trotz optimaler Hörgeräteanpassung erreichen Innenohrschwerhörige eine häufig ungenügende Spracherkennung. Der Vergleich eines entsprechenden Tonaudiogramms (Abb. O.1) erklärt die schlechten Resultate: gehört werden die nur wenig Information tragenden tiefen Töne, während die mittleren und hohen Frequenzen, in denen das Hauptsprachgebiet liegt, wegen fehlender oder ungenügender Hörreste nicht verwertet werden können.

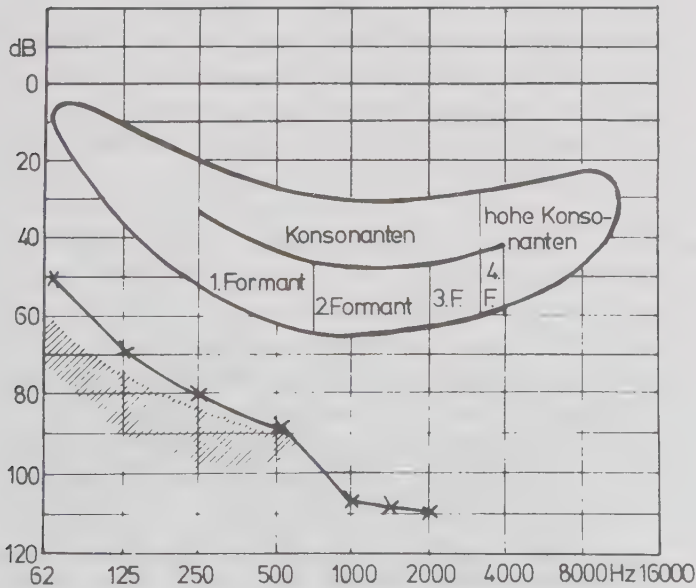


Abb. O.1 Lage des Hauptsprachgebietes (nach FANT) und der Hörschwelle eines Innenohrgeschädigten.

Diese Konstellation legt eine Manipulationsmöglichkeit nahe, die vielversprechend erscheint: die Transposition der Sprache in den Bereich der tiefen Frequenzen und damit in ein Gebiet geringeren Hörverlustes.

Das Prinzip läßt sich, auf visuelles System übertragen, an folgendem Beispiel veranschaulichen.

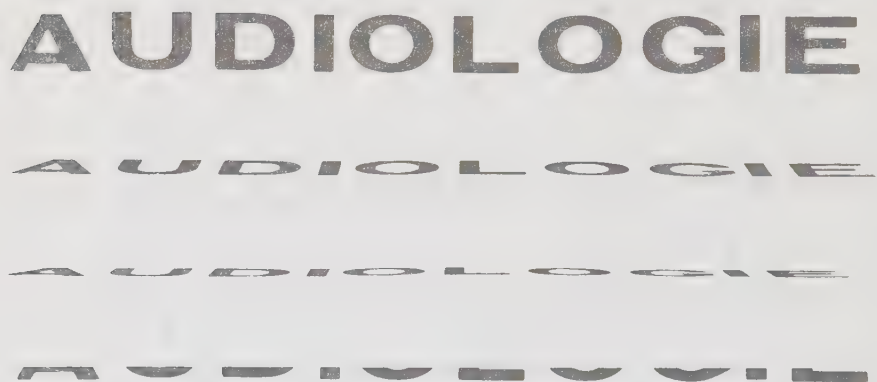


Abb. 0.2 Prinzip der Frequenztransposition übertragen auf das optische System: in der untersten Zeile ist das Wort "Audiologie" durch Abschneiden der oberen Buchstabenanteile nicht mehr lesbar, während in der dritten Zeile durch "Umkippen" des Wortes trotz gleicher Buchstabenhöhe ein erkennbares Schriftbild entsteht. Zeile 2 entspricht einer weniger starken "Kippung", Zeile 1 zeigt das Normalbild nach FINKENZELLER.

Während beim Betrachten des unteren Teils der Schrift kein Erkennen möglich ist, wird durch das "Umkippen"

des Schriftzuges ein zwar verzerrtes, aber doch erkennbares Bild wiedergegeben.

KEIDEL (1958) führte Versuche über das Sprachverständnis bei Übertragung mittels Vibration durch, bei der tiefer transponierte Sprache benützt wurde. Die zur zeitgleichen Untersetzung von KEIDEL (1973, 1974) benützte Apparatur entspricht dem in unseren Versuchen benützten Gerät.

Erste Versuche mit nach tiefen Frequenzen transponierter Sprache fanden bereits in den 20iger Jahren statt. Durch langsameren Lauf eines Grammophons wollte man Hochtonschwerhörigen ein Verstehen der Sprache ermöglichen. Standen zu dieser Zeit die technischen Schwierigkeiten zunächst im Vordergrund, so sind dies heute, vor allem nach Bewältigung des Zeitgleichheitsproblems, mehr physiologisch-funktionelle. Denn obwohl bei erster Betrachtung die Methode einfach und unkompliziert erscheint, ergeben sich bei eingehender Untersuchung Probleme, die zufriedenstellende Ergebnisse bei früheren Versuchen bisher verhinderten.

Die Kapazität des Ohres scheint in den nun benötigten tiefen Frequenzen nicht mehr ausreichend zu sein, um die Fülle des Informationsmaterials, die in flüssiger Sprache enthalten ist, aufzunehmen und zu verarbeiten. In diesem Zusammenhang sei nur auf das verminderte Frequenz- und Amplitudenauflösungsvermögen sowie auf die verlängerte Anklingzeit im Tieftonbereich hingewiesen.

Dies aber sind physiologische Beeinträchtigungen, die bereits beim Normalhörenden auftreten. Hinzu kommen die pathologischen Veränderungen des schwerhörigen Ohres, die ein Erkennen von tieffrequenter Sprache weiter behindern.

Diese Problematik zu diskutieren und eigene Ergebnisse an Normalhörenden und Gehörgeschädigten vergleichend zu interpretieren, ist Ziel dieser Arbeit.

Frequenzdiskrimination

Frequenzdiskriminationsvermögen bei Normalhörenden

In seinen Untersuchungen hat GENDEL (1973) auf den Zusammenhang von Frequenzunterscheidungsvermögen und Spracherkennung hingewiesen. Aus seiner Arbeit wird ersichtlich, daß ein gutes Erkennen von Vokalen und Konsonanten an ein ausreichendes Frequenzdiskriminationsvermögen gebunden ist. Damit ergibt sich eine wichtige Voraussetzung für die Durchführbarkeit unseres Projektes: das Auflösungsvermögen des Ohres muß auch in den nun verwendeten tieferen Frequenzbereichen genügend groß sein, um die Verständlichkeit zu gewährleisten. Dabei wäre keineswegs ein, absolut gesehen, gleichbleibender minimal erkennbarer Frequenzunterschied Δf ausreichend, da die "Frequenzdichte" durch Transponierung proportional zunimmt. Ein vereinfachendes Beispiel: das Ohr könne zwischen 1000 Hz und 2000 Hz 100 Frequenzschritte (jnd's) differenzieren und hätte damit ein Δf von 10 Hz. Die in den 1000 Hz enthaltene Information wird bei Transposition "verdichtet", nämlich auf den Bereich von 500 Hz bis 1000 Hz. Soll die darin enthaltene Information voll ausgenutzt werden, wären wieder 100 jnd's, also ein Δf von 5 Hz notwendig. Mit anderen Worten, das Verhältnis $\frac{\Delta f}{f}$ müßte konstant bleiben, das Weber-Fechner'sche Gesetz gültig sein.

Untersuchungen haben jedoch ergeben, daß Δf von der Grundfrequenz f sowie von der Intensität I abhängig ist.

ZWICKER (1967) fand, daß nur bei Lautstärken über 40 dB und Frequenzen über 500 Hz der Idealfall von $\frac{\Delta f}{f} = \text{const.}$ eintritt. Wenn wir in diesem Abschnitt der

Diskussion die Lautstärke einmal unberücksichtigt lassen, bedeutet das: nur bei Frequenzen über 500 Hz dürfte die "Frequenzverdichtung" keine Beeinträchtigung der Informationsverarbeitung mit sich bringen. Alle Frequenzen über 1000 Hz bei einer Untersetzung von zwei zu eins (2 : 1) (>1500 Hz bei 3 : 1, >2000 Hz bei 4 : 1) werden also ohne Informationsverlust auch nach Transposition aufgelöst. Unterhalb 500 Hz bleibt Δf mit 1,8 Hz in engen Grenzen konstant. Dadurch kann bei den nach Transposition unterhalb 500 Hz liegenden Frequenzen Information verlorengehen, die umso größer ist, je höher die Untersetzung gewählt wurde (siehe Abb. 1.1).

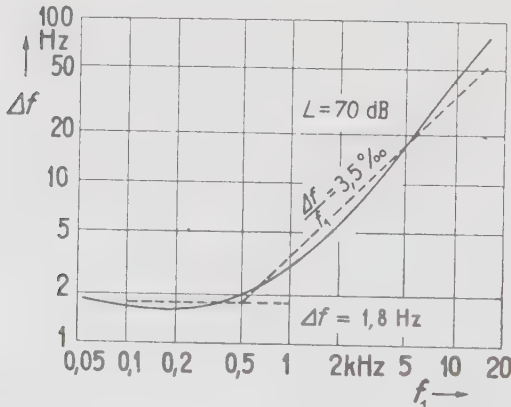


Abb. 1.1 Abhängigkeit der Tonhöhenunterschiedsschwelle Δf (Hz.) von der Tonhöhe f_1 (kHz.) bei $L = 70 \text{ dB}$ (aus ZWICKER 1967).

Legt man die Untersuchungen von SHOWER und BIDDULPH (1931) zugrunde, kommt man zu einem anderen Bild. Hier bleibt Δf zwischen 125 Hz und 2000 Hz mit

3 Hz (bei 40 dB SPL) ziemlich konstant. Damit würde der aus obiger Überlegung resultierende Informationsverlust das ganze Hauptsprachfrequenzspektrum umfassen (WEDENBURG, 1951 billigt den Frequenzen bis 2000 Hz 71% der Gesamterkennung der Sprache zu; bis 4000 Hz 93%).

Auch hier erscheint es hilfreich, sich die Problematik anhand der jnd's zu verdeutlichen: GULICK (1971) geht davon aus, daß das Ohr von 32 - 10 000 Hz 1385 Frequenzschritte (bei 40 dB SL) unterscheiden kann. Auf den Frequenzbereich von 500 - 2000 Hz entfallen dabei ca. 430 jnd's, auf jenen von 250 - 1000 Hz jedoch nur 280.

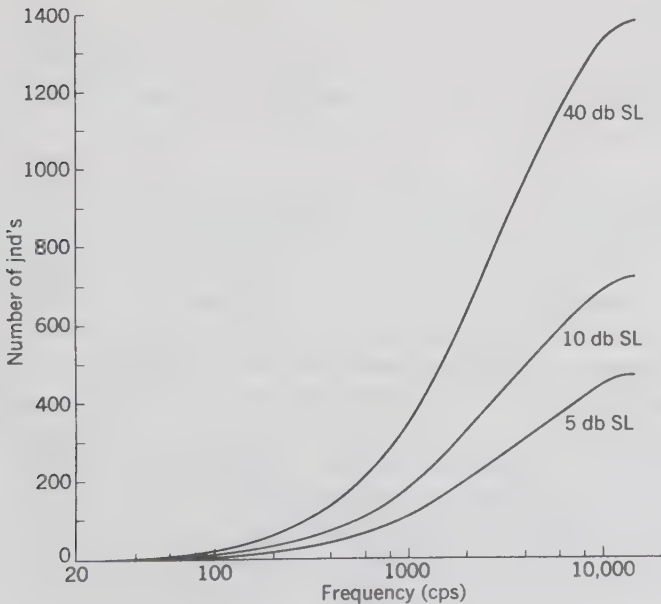


Abb. 1.2 Anzahl der gerade wahrnehmbaren Tonhöhen-schwankungen (jnd) in Abhängigkeit von Tonhöhe (Hz) und Lautstärke (dB) aus GULICK , 1971.

FELDTKELLER und ZWICKER (1956) stellten nur 850 unterscheidbare Tonhöhen beim menschlichen Ohr fest, 170 jnd's liegen unter, 670 über 500 Hz. Obwohl die Ergebnisse zum Teil erheblich differieren, was sicher auch im unterschiedlichen Versuchsaufbau bedingt sein dürfte, wird die Tendenz deutlich, daß der menschliche Gehörapparat mit abnehmender Frequenz proportional gesehen immer weniger in der Lage ist, Frequenzunterschiede zu verarbeiten.

Frequenzdiskrimination bei Gehörgeschädigten

Diese Untersuchungen wurden am intakten Organ durchgeführt. Da die zu prüfende Apparatur primär die Aufgabe haben soll, ein Sprachverstehen bei Schwerhörigen zu ermöglichen, ist diese Problematik vor allem bei den Gehörgeschädigten von entscheidendem Interesse.

GENGEL (1973) fand bei seinen Untersuchungen an 5 Gehörlosen ein bis zu 15fach vergrößertes Δf als bei den drei Normalhörenden. Die Anzahl der Probanden ist sicher zu klein, um statistisch abgesicherte Aussagen machen zu können, doch wird die geringere Leistungsfähigkeit des geschädigten Ohres deutlich. Während bei 500 Hz Δf bei Normalhörenden mit durchschnittlich 1,6 Hz (in recht guter Übereinstimmung mit den oben genannten Autoren) angegeben wird, beträgt es bei den Gehörgeschädigten in diesem Versuch 6,7 Hz. Die Durchschnittswerte bei 1,5 kHz betrugen 2,1 Hz bei Normal- und 20,6 Hz bei Schwerhörigen (3 kHz : 6,1 Hz bzw. 40,8 Hz)

Aus diesen Versuchen läßt sich eine weitere Schlußfolgerung

ziehen: die Leistungsfähigkeit des geschädigten Ohres streut interindividuell stärker als die des normalen Ohres, abhängig von der Art und dem Ausmaß der Schädigung. Obwohl GENDEL bereits eine gewisse Vorauswahl bei den hörgeschädigten Versuchspersonen vornahm, kam es innerhalb eines Versuches zu Schwankungen bis zum 8fachen.

Auf diese Tatsache weist LANGENBECK (1963) hin. Auch er ermittelte einen stark von der Art und Schwere der Schädigung abhängigen Verlust für Frequenzunterscheidungen: je stärker der Hörverlust, desto größer auch der Verlust des Frequenzdiskriminationsvermögens. Bei Innenohrschwerhörigen fand er ein bis auf das 10fache gegenüber der Norm vergrößertes Δf (siehe Abb. 1.3).

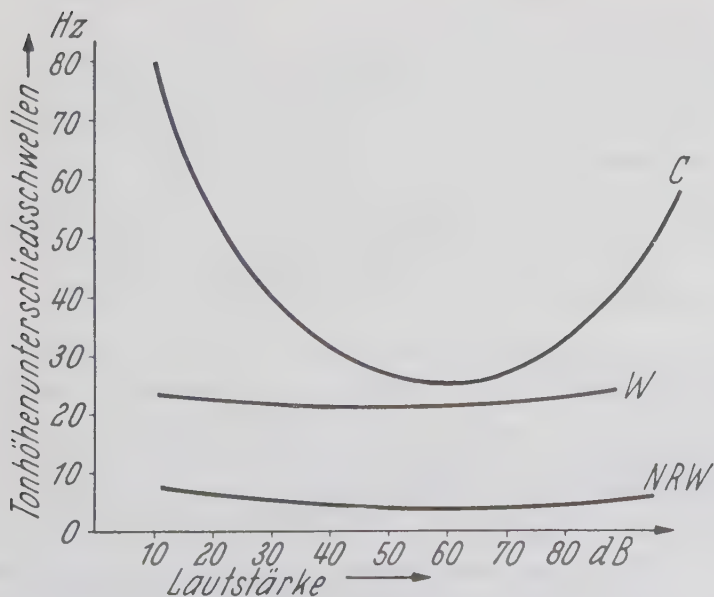


Abb. 1.3 Tonhöhenunterschiedsschwelle Δf (Hz) bei 1000 Hz in Abhängigkeit der Lautstärke I (dB)
 NRW: Normalhörender ; W: gleichbleibend erhöhtes Δf ; C: Cortiorganschwerhörigkeit (nach LANGENBECK, 1963)

Nun wissen wir, daß das geschädigte Ohr in der Auflösung von Frequenzen dem gesunden Ohr unterlegen ist. Entscheidend für unsere Versuche ist jedoch nicht so sehr das Diskriminationsvermögen im normalen Sprachbereich, sondern bei den tieferen Frequenzen. Wird Δf bei Gehörgeschädigten zu den tieferen Frequenzen hin unproportional schlechter?

Wie oben erwähnt, kam LANGENBECK bei 1000 Hz, abhängig von Lautstärke und der Art der Gehörschädigung, auf ein bis zu 10fach vergrößertes Δf , während bei tieferen Frequenzen (250 - 600 Hz) die Tonhöhenunterschiedsschwelle nur um das ca. 4fache der Norm erhöht ist.

Ein ähnliches Ergebnis liefern bei erneuter Betrachtung die Untersuchungen GENGELS (1973). Bei 500 Hz ist Δf der Gehörlosen um das ca. 3,5fache, bei 1500 Hz jedoch um das ca. 9,8fache der Norm erhöht. Diese Zahlen lassen sich wie folgt interpretieren: in dem Bereich größerer Hörschädigung ist auch das Frequenzunterscheidungsvermögen stärker eingeschränkt. Bei den tieferen Tönen dagegen, in einem Frequenzbereich also, in dem ein größeres Resthörvermögen besteht, ist auch das Tonhöhenunterscheidungsvermögen besser erhalten (siehe Tab. 1).

Frequenz (kHz)	0,5		1,5		3,0	
Dauer (ms)	50	500	50	500	50	500
Schwerhörige	12,5	6,7	33,5	20,6	57,0	40,8
Normalhörende	4,3	1,6	7,9	2,1	21,3	6,1
SH/NH	2,9	3,5	4,3	9,8	2,3	6,7

Tab. 1 Frequenzunterschiedsschwelle in Hz für Normal- und Schwerhörige in Abhängigkeit von Frequenz (kHz) und Dauer des Tones (ms) sowie der Quotient der beiden Werte (nach GENGEL 1973).

Amplitudendiskrimination

Amplitudendiskriminationsvermögen bei Normalhörenden

Neben der Frequenz billigt FLETCHER (1953) der Lautstärke eine wichtige Rolle bei der Erkennung von Lauten zu. Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, das Lautstärkenunterscheidungsvermögen des menschlichen Ohres in dem für uns wichtigen Bereich zu untersuchen.

Dabei findet sich für das Amplitudendiskriminationsvermögen eine Abhängigkeit von Frequenz und Intensität, wobei wir, wie schon in dem vorhergehenden Kapitel, die Intensität außer Acht lassen und weiter unten abhandeln wollen.

LANGENBECK (1963) gibt beim Normalhörenden nur eine geringe Abhängigkeit ΔI 's von der Frequenz an. Es bleibt (bei 40 dB SL) mit 1,0 bis 1,5 dB zwischen 128 Hz und 4096 Hz weitgehend konstant.

Zu etwas anderen Ergebnissen kamen ZWICKER (1967) und RIESZ (1928). RIESZ fand Werte, die zwischen 1,5 dB bei 2 kHz und 3,5 dB bei 70 Hz lagen (bei 40 dB SL). ZWICKERS Werte reichen von ca. 2,5 dB bei 2 kHz bis zu 6 dB bei 100 Hz (bei 40 dB SPL); rechnet man den letzten Wert auf 40 dB SL um, ergibt sich für ΔI ca. 3,5 dB bei 100 Hz.

Um die eventuellen Auswirkungen des verminderten Amplitudendiskriminationsvermögens beurteilen zu können, sind einige grundsätzliche Betrachtungen notwendig: SCHUBERT (1958) gibt die Sprachdynamik, das heißt die Schwankungsbreite der Lautstärke innerhalb normaler Sprache, mit 30 dB an. Durch diese relativ geringen Amplitudenänderungen kann bereits ein geringer Rückgang von ΔI einen großen Verlust an jnd's bewirken. Wenn wir für

ΔI bei 1000 Hz 1,5 dB annehmen, ergeben sich dadurch 20 für das Ohr unterscheidbare Lautstärkenschwankungen innerhalb der Sprachdynamik. Schon bei einer Erhöhung von ΔI auf 3,0 dB im Tieftonbereich kann nur noch die Hälfte der Amplitudenänderungen wahrgenommen werden.

Problematik der Hörschwelle im Tieftonbereich

Hinzu kommt ein für die Untersetzung spezifisches Problem : die Sprache wird aus dem Bereich relativ gleichbleibender absoluter Hörschwelle in einen Frequenzbereich mit stark abfallender Empfindlichkeit des Ohres transponiert (siehe Abb. 2.1).

Die daraus resultierende Veränderung der Lautstärkepegel zueinander könnte das Erkennen von Vokalen erschweren, wie wir anhand des Vokales "e" aufzeigen wollen: "e" besitzt im Bereich von 350 Hz sowie von 2000 - 3500 Hz zwei Formanten, wobei der erste Formant 50 dB, der zweite 20-30 dB über der Hörschwelle bei den Untersuchungen von OEKEN (1966) liegt. Der Lautstärkenunterschied beträgt nach Korrektur durch den Hörverlust ca. 13 dB. Wird nun dieser Vokal mit 3 : 1 untersetzt, kommt der erste Formant bei ca. 117 Hz., der zweite bei 670 - 1170 Hz zu liegen. Der vom Ohr wahrgenommene Lautstärkenunterschied beträgt nun nur noch 4 dB.

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, daß das Lautstärkenverhältnis der einzelnen Sprachkomponenten in nicht unerheblichem Maße verschoben wird, eine Tatsache, die auch durch ein verbessertes Amplitudenauflösungsvermögen nicht zu kompensieren wäre. Für NESSEL (1960) liegt darin ein Hauptgrund für die schlechtere Verständlichkeit von frequenztransponierter Sprache. Um das ursprüngliche Verhältnis der Lautstärken wiederher-

zustellen, wäre entweder eine Verstärkung der unteren Frequenzen in dem Maße erforderlich, in dem der physiologische Hörverlust zunimmt, oder technisch einfacher durch Filterung zu erreichen, eine Abschwächung der hohen Töne in umgekehrter Weise. Damit wären wir bei der Problematik des geschädigten Ohres. Hier zeigt die Hörschwellenkurve nicht den beim Normalhörenden ausgeprägten Anstieg der Empfindlichkeit zu den hohen Frequenzen hin, sondern bedingt durch den Hochtonverlust, einen interindividuell stark schwankenden geringen oder fehlenden Abfall der Hörschwelle im Tieftonbereich (siehe Abb. 2.2)

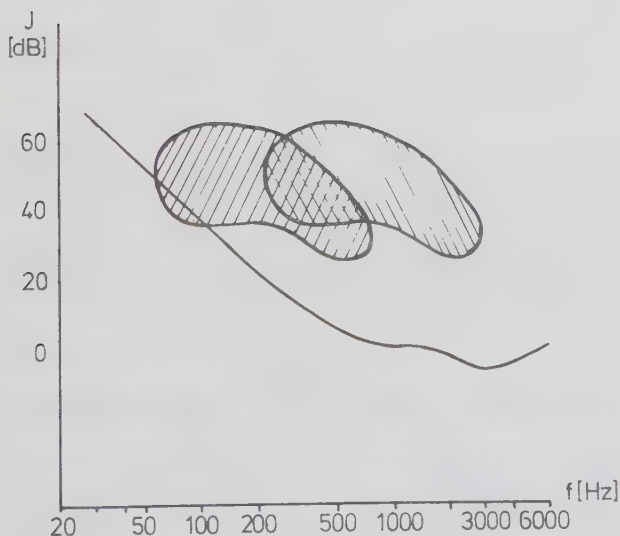


Abb. 2.1 Lage des Hauptsprachgebietes nach RUSKE (Zit. bei KEIDEL 1973a) in Beziehung zur absoluten Hörschwelle nach FLETCHER und MUNSON (Zit. bei KEIDEL 1973a) vor und nach Untersetzung um 3:1. Die Komprimierung der Frequenzen wird durch den logarithmischen Maßstab nicht deutlich.

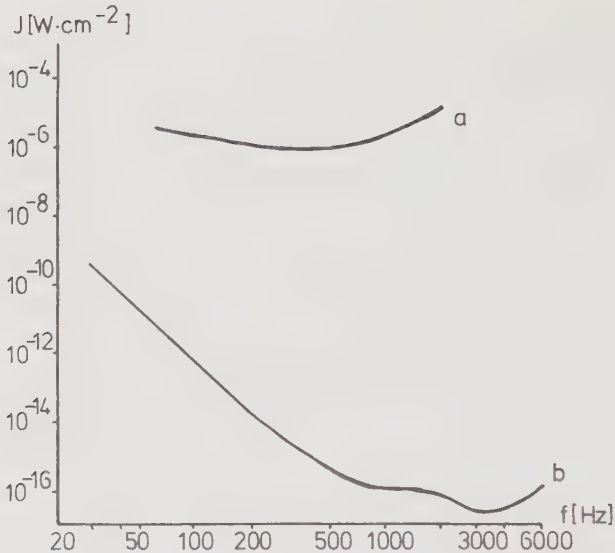


Abb. 2.2 Lage der absoluten Hörschwelle Normalhörender b) (nach FLETCHER u. MUNSON, Zit. bei KEIDEL 1973) und einer gehörgeschädigten VP a) (♀ 16J.)

Damit würde man gerade bei den Probanden einen wichtigen Vorteil finden, denen die zu prüfende Apparatur Vorteile beim Spracherkennen bringen soll.

Amplitudendiskriminationsvermögen bei Gehörgeschädigten

Um diesen Vorteil nutzen zu können, müßte das Lautstärkenunterscheidungsvermögen bei Schwerhörigen weitgehend intakt sein. Nun ist bekannt, daß bei vielen Innenohrschwerhörigen durch Lautheitsausgleich (Recruitment) sogar eine Verkleinerung von ΔI gegenüber der Norm eintritt, "die in den betroffenen Tonintensitätsgebieten (mit starkem Schwellenabfall) zur Unfähigkeit Lautheitsunterschiede festzustellen, führen kann". (LANGENBECK 1963). In diesem

Bereich laufen die Kurven gleicher Lautstärke dicht beieinander und überkreuzen sich teilweise. Entscheidend ist jedoch hier, ähnlich wie bei der Frequenzdiskrimination, daß die pathologischen Veränderungen hauptsächlich in dem Bereich der Hörschädigung liegen und sich mit Verbesserung der Hörfähigkeit zu den tiefen Frequenzen hin normalisieren. In dem für uns wichtigen Tieftonbereich kann also von einem weitgehend normalen Amplitudendiskriminationsvermögen ausgegangen werden (siehe Abb 2.3), wobei eine pauschale Aussage bei der Vielzahl der möglichen Hörschädigungen nicht möglich ist.

Atlas - Audiogramm

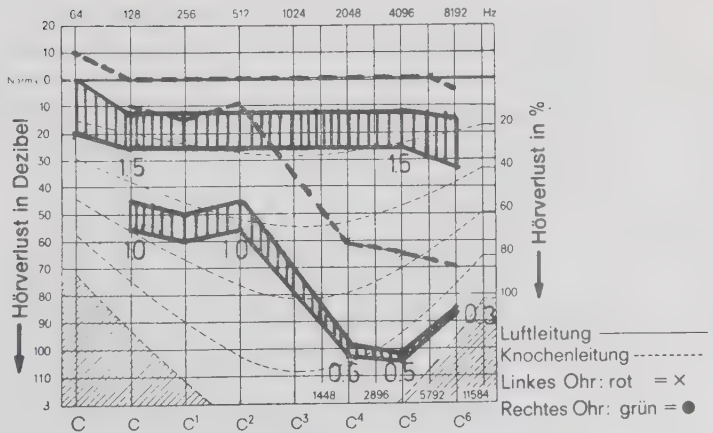


Abb. 2.3 Amplitudenunterschiedsschwelle ΔI (dB) bei Normalhörenden (a) und Gehörgeschädigten (b) in Abhängigkeit von der Tonhöhe (Hz). Gestrichelt ist die Hörschwelle eingetragen, nach LANGENBECK, 1963

Einfluß der Lautstärke auf Frequenzdiskrimination

Bisher wurde ein Parameter sowohl bei der Diskussion des Frequenz- als auch des Amplitudendiskriminationsvermögens nicht berücksichtigt: die Intensität. Während ihr Einfluß bei Versuchen mit Normalhörenden VPs zu vernachlässigen ist, da sie in jedem Fall so weit überschwellig gewählt werden kann, daß ΔI und Δf ein Minimum, das Auflösungsvermögen also ein Maximum erreicht, müssen ihre Auswirkungen bei Versuchen mit Gehörlosen aus erklärlichen Gründen in die Betrachtung mit einbezogen werden. Wichtig ist das Verhalten des Gehörorgans im schwelennahen Bereich.

Obwohl die Absolutwerte der einzelnen Autoren (LANGENBECK, ZWICKER und GULICK) differieren, ist die Tendenz bei allen Arbeiten ersichtlich, daß sich mit abnehmender Lautstärke das Frequenzunterscheidungsvermögen verschlechtert. ZWICKER (1967) fand für einen 1000 Hz Ton bei 10 dB SPL ein Δf von 20 Hz, bei 20 dB SPL ca. 6 Hz, bei 40 dB ca. 2,5 Hz (siehe Abb. 3.1). GULICK (1971) gibt für 10 dB SL und 1000 Hz ein Δf von 7,5 Hz, bei 40 dB SL ein Δf von 3 Hz an:

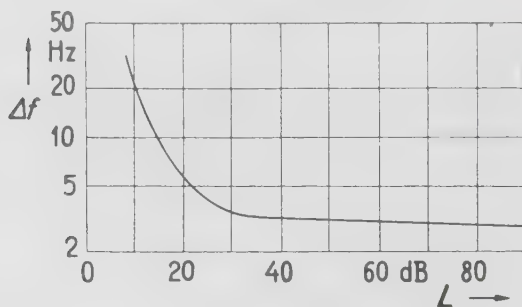


Abb. 3.1 Frequenzunterschiedsschwelle Δf (Hz) in Abhängigkeit der Lautstärke (dB) bei 1000 Hz (aus ZWICKER, 1967)

Einheitlich findet man jedoch bei den Autoren, daß der Einfluß der Lautstärke zu den tiefen Tönen hin nicht zunimmt, was eine weitere Beeinträchtigung bei der Erkennung von Lauten bedeutet hätte. Eine weitere wichtige Übereinstimmung besteht in der Annahme einer bestimmten Grenzlautstärke, jenseits der das Frequenzauflösungsvermögen relativ konstant bleibt. Dieser Grenzwert schwankt bei den einzelnen Autoren zwischen 20 und 40 dB und ist teilweise frequenzabhängig. Besonders deutlich wird der Einfluß der Lautstärke bei der Betrachtung der gerade erkennbaren Frequenzunterschiede. GULICK (1971) bestimmte die Anzahl der jnd's von 31 - 10 000 Hz in Abhängigkeit der Lautstärke. Bei einer Überschwelligkeit von 40 dB fand er in diesem Bereich 1385 jnd's, bei 5 dB SL nur noch 475. Die Abb. 1.2 zeigt jedoch, daß die Anzahl der jnd's besonders stark im Bereich der hohen Frequenzen differiert.

Einfluß der Lautstärke auf Amplitudendiskrimination

Eine größere Abhängigkeit von der Lautstärke zeigt sich beim Amplitudendiskriminationsvermögen. LANGENBECK (1963) gibt ΔI für 1000 Hz bei 20 dB SL mit 1,5 dB, bei 40 dB SL mit 1,0 dB, bei 60 dB SL mit 0,4 dB sowie bei 80 dB SL 0,2 dB an. GULICK (1971) fand für ΔI bei 10 dB SL 4,6 dB bei 30 dB 1,9 dB, sowie bei 60 dB 1 dB (jeweils für einen 1000 Hz Ton). ZWICKER (1967) gibt ein von etwa 10— 80 dB relativ konstantes ΔI mit 2 dB, das erst bei 100 dB SPL auf 1 dB absinkt, an.

Auf einen ausgeprägten Abfall von ΔI bei geringer Intensität bei den tiefen Frequenzen weist nur GULICK (1971) hin. Bei 70 Hz und 10 dB SL liegt sein ΔI bei 15 dB, während es bei gleicher Intensität 1000 Hz nur 4,6 dB beträgt (siehe Abb. 3.2).

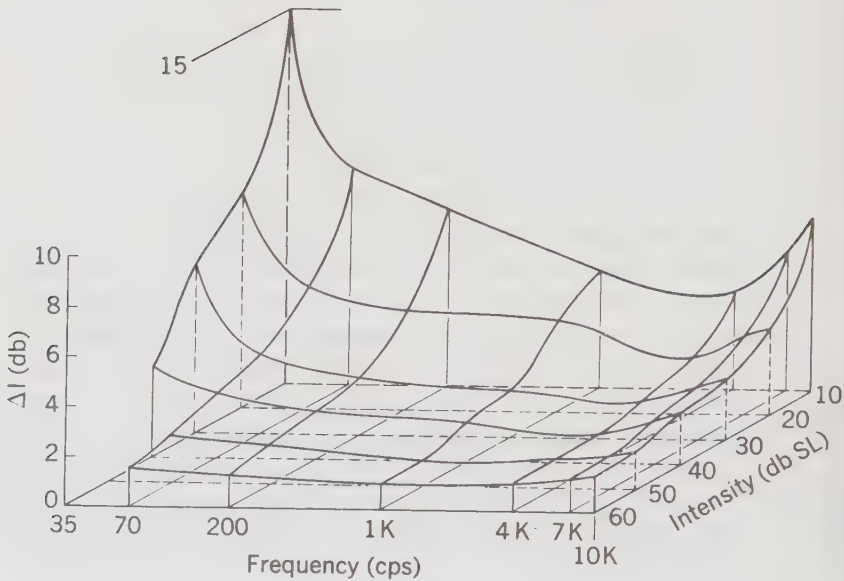


Abb. 3.2 Amplitudendiskriminationsvermögen ΔI (dB) in Abhängigkeit von Lautstärke I (dB) und Tonhöhe f (Hz) (aus GULICK 1971).

Einfluß der Lautstärke auf Wortverständlichkeit

Die praktische Relevanz dieser theoretisch gefundenen Abhängigkeit der Einzelfunktionen des Ohres von der Lautstärke wird unterstrichen durch die Untersuchungen SCHUBERTs (1958), BRINKMANNs (1974) und HAHLBROCKs (1957). SCHUBERT fand erst bei 45 dB Lautstärke 100%ige Silbenverständlichkeit, ein Wert, den BRINKMANN und HAHLBROCK mit Einsilbern bestätigten.

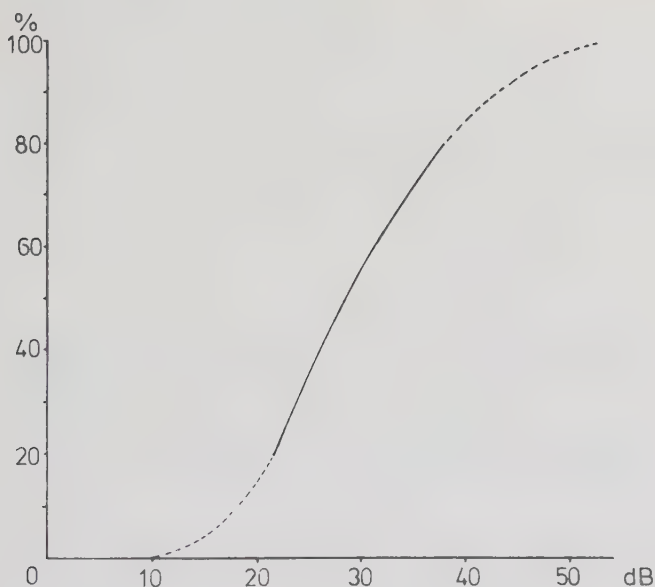


Abb. 3.3 Verständlichkeit von Einsilbern in Abhängigkeit der Lautstärke (dB) (nach BRINKMANN 1974)

Auch hier findet sich jenseits einer Grenzlautstärke ein Bereich, in dem die Verständlichkeit von der Intensität unabhängig ist. Ab dieser Lautstärke scheinen die für die Erkennung von Lauten wichtigen Funktionen des Gehörorgans ihre volle Leistungsfähigkeit erreicht zu haben. Dieser Wert läßt sich durchaus mit den Ergebnissen der vorhergehenden Artikel in Einklang bringen.

Die Untersuchungen HAHLBROCKS und BRINKMANNs wurden in Normalfrequenzlage durchgeführt und berücksichtigen nicht die speziellen Probleme der Untersetzung. Nur SCHUBERT (1958) führte auch mit untersetzter, jedoch nicht zeitgleicher Sprache Versuche durch. Dabei zeigte sich, daß die Verständlichkeit untersetzter Silben noch wesentlich

stärker von der Lautstärke abhängig waren. Je stärker die Untersetzung, desto lauter mußte die Sprache angeboten werden, um den selben Verständlichkeitsgrad zu erzielen wie bei geringerer Untersetzung. Dies ist weiter nicht verwunderlich, da mit zunehmender Herabsetzung der Frequenzen die abnehmende Hörschwelle ins Gewicht fällt. Interessant dagegen ist die Tatsache, daß die Kurven nicht nur um den physiologischen Hörverlust, als um einen definierten dB-Betrag, zu den größeren Lautstärken hin verschoben sind, sondern, daß die Steilheit dieser Kurven mit stärkerer Untersetzung abnimmt (siehe Abb. 3.4). Ein analoges Ergebnis fand sich auch bei Durchführung der Versuche mit gehörlosen Versuchspersonen. Das Ohr reagiert also bei untergesetzter Sprache auf Lautstärkenabfall empfindlicher als bei Normalsprache.

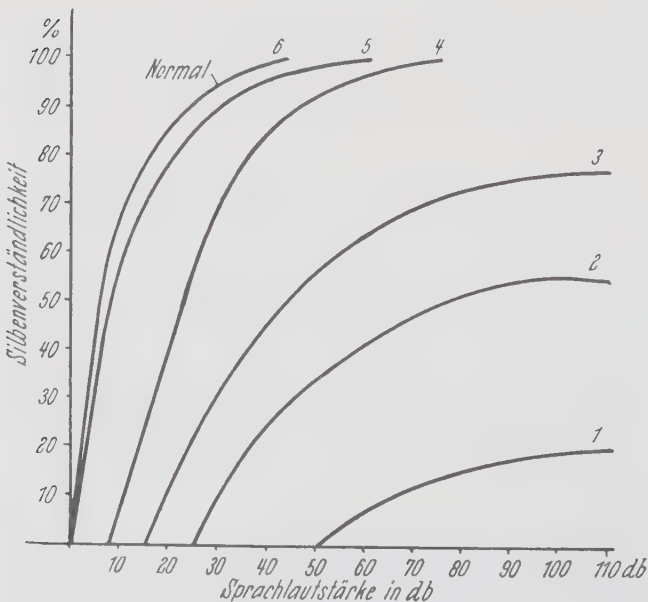


Abb. 3.4 Silbenverständlichkeit in Abhängigkeit der Sprachlautstärke (dB) bei verschiedenen Bandgeschwindigkeiten 1:-50,5%, 2:-40,5%, 3:-35,1%, 4:-21,2%, 5:-8,4%, 6:±0,0% = normale Sprache (SCHUBERT 1958)

Problematik der Segmentierung

Durch die zeitliche Untersetzung der Sprache ist in unserem Versuchsaufbau eine Segmentierung nötig, die zu einer Verkürzung der Laute führen kann. Die Zeitdauer des unteretzten Signals ist von der Untersetzung, der Segmentzeit, der Dauer des zu untersetzenden Lautes und dem Zufall abhängig.

Einfluß der Anklingzeit auf Lautheit und Schwelle eines Tones

McFADDEN (1975) untersuchte die Abhängigkeit der subjektiven Lautstärke von der Zeitdauer. Er veränderte die Dauer eines 1000 Hz Tones von 1200 bis 25 ms und versuchte durch Änderung der Intensität dieselbe Lautheit zu erzeugen. Dabei zeigte sich, daß je nach Versuchsperson der Ton pro Halbierung der Zeitdauer um 3 - 15 dB lauter überspielt werden mußte. ZWICKER (1975) erforschte die Schwelle eines Tones in Abhängigkeit der Zeitdauer. Seine Untersuchungen zeigen das Ansteigen der Schwelle bei Verkürzung der Dauer ab einen Grenzwert von 200 ms. So liegt die Hörschwelle bei 200 ms und 500 Hz bei ca. 7 dB. Wird das Tonsignal auf 10 ms verkürzt, erhöht sich die Schwelle auf 20 dB. Ein 125 Hz-Ton wird bei einer Dauer von 200 ms mit 25 dB gehört, während bei 10 ms 35 dB dazu notwendig sind. Auch TANIEWSKI (1967) bestätigte mit seinen Untersuchungen diese Tendenz. Die Hörschwelle eines 250 Hertztones lag bei einer Zeitdauer von 4 ms 35 dB über derjenigen eines 1 sec andauernden Tones. Bei 1000 Hz betrug der Unterschied 56 dB. Ähnlichen Einfluß fand TANIEWSKI auch beim geschädigten Ohr. Der Unterschied der Schwellen eines 4 ms und eines 1 sec Tones lag bei Innenohrschwerhörigen (mit Schädigung des Dauerhörens) bei 250 Hz bei 36 dB (bei 1000 Hz : 52 dB). Die Werte

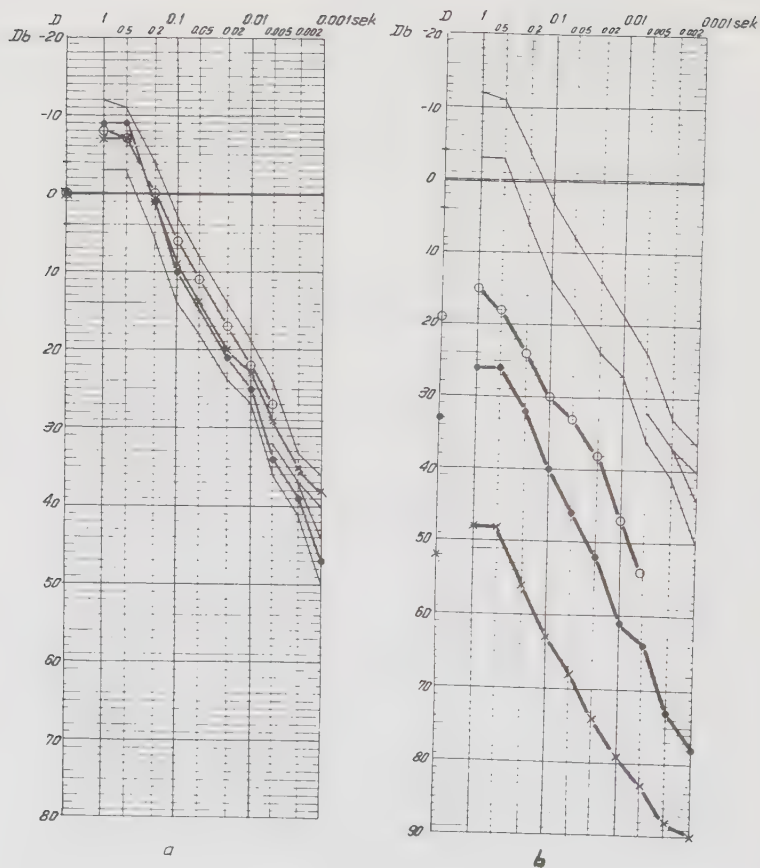


Abb. 4.1 Abhängigkeit der Schwellenintensität (dB) von der Zeitdauer (ms) des Tones bei
 a) normalhörenden Versuchspersonen und b) bei Schallempfindungsstörungen vom Typ der Beschädigung des Ganglions oder des N. cochlearis bei 250 Hz, 1000 Hz, 4000 Hz. (aus TANIEWSKI, 1967)

zeigen, daß die Änderung der Schwelle Normalhörender bei 1000 Hz am größten ist und zu den tiefen und hohen Frequenzen hin abnimmt (siehe Abb. 4.1), während bei Gehörgeschädigten bis 4000 Hz eine stete Zunahme festzustellen ist.

Auch GENDEL (1973) führte Untersuchungen mit Normal- und Schwerhörigen durch und untersuchte das Frequenzdiskriminationsvermögen in Abhängigkeit der Anklingzeit. Bei seinen Versuchen war das Kurzhörvermögen der Schwerhörigen relativ besser ausgeprägt, auch wenn, absolut gesehen, die normalhörenden Versuchspersonen ein zwischen 2,9fach (bei 500 Hz) und 4,5fach (bei 1,5 kHz) geringeres Δf bei 50 ms hatten. Vergleicht man diese Werte mit jenen bei 500 ms (siehe Seite 13, Tab. 1), so zeigt sich, daß der Verlust an Tonhöhenunterscheidungsvermögen mit Verkürzung der Tondauer bei den Normalhörenden stärker zunimmt als bei Gehörgeschädigten.

Die Frequenzunterscheidungsschwelle bei Schwerhörigen verdoppelte sich bei 500 Hz von 500 ms zu 50 ms, während sich dieser Wert bei Normalhörenden auf das 2,7fach vergrößerte (1,5 kHz : 1,6fach bzw. 3,8fach; 3 kHz : 1,4fach bzw. 3,5fach). Diese Zahlen benötigen wegen der geringen Anzahl der Versuchspersonen sicher eine Überprüfung, doch liegt unser Hauptinteresse nicht in der absoluten Größe, sondern in der Tendenz der Werte. Es zeigt sich in diesen Versuchen keine abnormale Vergrößerung und damit weitere Verschlechterung von Δf durch Verminderung der Anklingzeit bei gehörgeschädigten Versuchspersonen, wobei jedoch der allgemeine Anstieg der Tonhöhe-Unterschiedsschwelle nicht übersehen werden darf.

Minstdauer eines Lautes zur Erkennung

Daß neben der Herabsetzung der Hörschwelle, sowie der Verschlechterung des Frequenzdiskriminationsvermögens bei kurzen Tönen auch eine verminderte Verarbeitungskapazität des Ohres besteht, lassen die Versuche von ENDRES (1969) sowie PICARD und BODE (1974) vermuten. PICARD und BODE (1974) verglichen die Verständlichkeit von frequenztransponierten CVC-Syllaben mit jener von frequenzunteretzten und zeitgleichen Silben (Untersetzung jeweils 2:1). Sie kamen zu folgenden Ergebnissen:

1. Anfangskonsonanten und Vokale waren im 1. Teil signifikant besser zu verstehen als im 2..
2. Das Verständnis der Endkonsonanten in Test 1 unterschied sich nicht wesentlich von dem in Test 2.
3. Bei Test 1 waren Anfangs- und Endkonsonant gleich gut zu verstehen, das Verständnis der Konsonanten war signifikant besser als das der Vokale.
4. Beim 2. Test unterschied sich der 1.Konsonant vom Verständnis her nicht sehr vom Vokal, beide waren schlechter zu verstehen als der Endkonsonant.

Daraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Zumindest bei den tieferen Frequenzen ist die Fähigkeit des Gehörorgans, rasch aufeinander folgende Informationen zu verarbeiten, gestört; es benötigt dazu längere Zeit. Diese These wird dadurch erhärtet, daß die nicht zeitgleichen Syllaben besser verstanden werden, bei beiden Testreihen jedoch kein Unterschied in der Erkennung des letzten Konsonanten bestand. Nach

den Endkonsonanten wird das Ohr durch die folgende Pause nicht mehr in der Verarbeitung durch weitere Informationen gestört.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt ENDRES (1969). Er verkürzte alle Laute eines Logatoms jeweils von der Mitte her, um die Lautübergänge intakt zu lassen, auf die zur Wahrnehmung benötigte Mindestdauer von 30 ms. Diese verkürzten Logatome spielte er mit folgender Überlegung mehrmals ab: werden die Silben nach mehrmaligem Anbieten häufiger erkannt, so ist die zur Erkennung des Logatums nötige Information nicht verloren gegangen, jedoch zeitmäßig so kurz, daß sie vom informationsverarbeitenden Apparat auf Anhieb nicht wiedererkannt wird. Die Ergebnisse scheinen diese Theorie zu bestätigen: beim 1. Durchlauf wurden 64% der Silben richtig erkannt, während bei zweimaligem Abspielen 70%, bei dreimaligem Anbieten 74% richtig angegeben wurden.

MEHMKE (1964) fand auch eine lautliche Veränderung bei kurz angespieltem Signal. Der Konsonant "w" wird nur bei einer Anklingzeit von größer als 40 ms als solcher verstanden, während er bei kürzeren Zeiten als "b" mißverstanden wird.

Die Untersuchungen von SCHUBERT (1958) lassen vermuten, daß das geschädigte Ohr bei der Verarbeitung von Informationen noch stärker gestört ist. SCHUBERT bestimmte die zum Erkennen eines Vokales nötige Mindestzeit bei ein- und zweimaligem Hören mit Normalhörenden und geschädigten Versuchspersonen. Dabei zeigt sich bei einmaligem Hören der Vokale eine wesentlich geringere Anklingzeit für Normalhörende, wobei bei zweimaligem Abspielen dieser

Vorsprung kleiner wird (einzige Ausnahme bildet der Vokal "u"). Folgt man nun den Überlegungen von ENDRES, so bedeutet das: das geschädigte Gehörorgan kann die ankommende Information nicht so schnell verarbeiten wie das normale Ohr, kann jedoch durch mehrmaliges Hören die Lautsignale besser verwerten und die Anklingzeit verkürzen.

Nun steht im Mittelpunkt unseres Interesses, inwieweit die Anklingzeiten der einzelnen Laute bei unseren Versuchen in die Nähe dieser von SCHUBERT gefundenen Grenzwerte kommen. Nimmt man die Dauer der Vokale mit 99 (i) bis 236 (a) ms an (JENSEN 1972), so kann bei einer Segmentzeit von 50 ms davon ausgehen, daß sich die Anklingdauer nur unwesentlich verändert und damit keine weitere Beeinträchtigung des Verständnisses zu erwarten ist.

Experimenteller Teil

Auswahl von Test und Segmentzeit

Um die Frage nach dem geeigneten Test beantworten zu können, muß man sich über die Anforderungen im Klaren sein. Wünschenswert wäre ein standardisiertes Verfahren mit großer Verständlichkeit. Von EGAN (Zit. bei HAHLBROCK) wissen wir, daß die Verständlichkeit mit der Anzahl der Laute zunimmt, sodaß ein Test mit mehrsilbigen Wörtern am zweckmäßigsten erscheint. In den vorhergehenden Kapiteln konnte die Notwendigkeit ausreichender Lautstärke aufgezeigt werden. Um ihren Einfluß soweit wie möglich reduzieren zu können, sind Testreihen nötig, die bereits bei geringer Lautstärke 100%ige Verständlichkeit bieten. Nur so können falsch verstandene Wörter eindeutig der Manipulation durch Untersetzung und Filterung zugeordnet werden. Ein weiterer Vorteil wäre eine der Umgangssprache ähnliche Lautzusammensetzung.

Am ehesten kommt der "Freiburger Zahlentest" als standardisiertes Verfahren diesen Vorstellungen nahe. Übereinstimmend fanden BRINKMANN (1974) und HAHLBROCK (1957) bei diesem Test die steilste Verständlichkeitskurve in Abhängigkeit von der Lautstärke, auch wenn ihre Absolutwerte etwas differieren (BRINKMANN 30 dB, HAHLBROCK 20 dB). DANILOFF (1975) untersuchte das Zahlenverständnis bei Gehörgeschädigten und fand auch bei diesen Versuchspersonen noch ein relativ gutes Verständnis, bei denen das Wortverständnis schon gegen 0 geht. Aus diesem Grund erscheint dieser Test auch bei dieser Versuchsgruppe geeignet zu sein. Als

Nachteil muß jedoch eine große Differenz in der Lautzusammensetzung zwischen Test und Umgangssprache in Kauf genommen werden (HAHLBROCK 1957). Dies scheint um so eher vertretbar, als es sich nicht um eine Hörprüfmethode, sondern um die Erprobung frequenzuntersetzter Sprache handelt.

Des weiteren müssen noch 3 Parameter festgelegt werden: die Segmentzeit, die Untersetzung und die Filterung. Während die beiden letzten Veränderlichen variabel bleiben sollen, um in ihrer Abhängigkeit die Verständlichkeit zu prüfen, muß die Segmentzeit optimal gewählt werden, um sie als Störfaktor weitgehend zu eliminieren. Zu diesem Zweck wurden zu Anfang der Untersuchung mit sechs naiven Versuchspersonen Versuche mit unterschiedlichen Segmentzeiten durchgeführt. Dabei zeigte sich bei allen Untersetzungen bei 26 - 110 ms ein Optimum an Verständlichkeit, sodaß ein Mittelwert von 50 ms bei allen folgenden Testreihen beibehalten wurde.

Versuchsaufbau und Durchführung

Technische Geräte

Der Freiburger Zahlentest wurde von Originalbändern (Aufnahme 1969) über Frequenzumsetzer (Konstr. Priv. Doz. P. Finkenzeller), Filter (Krohn-hite model 3550 Filter 24 dB./oct.), Abschwächer (LV-Attenuator Type LP 71 Radiometer Kopenhagen) und Verstärker (Grundig SW 80) mittels Kopfhörer (Sennheiser HD 414) übertragen. Dadurch ergab sich folgender Versuchsaufbau:



Abb. 6.1 Versuchsaufbau

Wichtigstes Gerät ist der von FINKENZELLER entwickelte zeitgleich arbeitende Umsetzer. Das Prinzip beruht auf einer Segmentierung der Sprache, wobei die Segmente ohne Klickbildung miteinander verbunden wurden (KEIDEL 1973 b, 1974; FINKENZELLER 1973).

Die Versuchspersonen saßen in einer schallgedämpften Kammer (Dämpfung ca. 40 dB) und notierten auf vorgefertigten Protokollen die gehörten Zahlen. Um Auswendiglernen während des Trainings zu verhindern, wurde unter Testbedingung die Reihenfolge der Zahlen geändert.

Von einigen Umsetzungen und Filterungen wurden Tonbandaufzeichnungen gemacht (Versuche von FINKENZELLER), die über Audiometer (Philips Typ HD 8741/20) abgespielt wurden.

Lautstärken- und Filtereinstellung

Von jeder neuen Einstellung wurde mit Hilfe des Abschwächers die Schwelle bestimmt, um die genaue Lautstärke in dB SL angeben zu können. Dabei wurde folgendermaßen verfahren: das Testmaterial wurde wie unter Versuchsbedingungen, jedoch unter ständiger Verringerung der Lautstärke, mittels Attenuator abgespielt. Mit Gegen sprechanlage war eine Verständigung von Versuchsperson und Versuchsleiter möglich. Als Schwelle wurde die Einstellung angenommen, bei der das Sprachsignal gerade eben nicht hörbar war. Mit demselben Verfahren wurde auch die Übertragungscharakteristik des Systems bei verschiedenen Einstellungen bestimmt, wobei als Testsignal Sinustöne unterschiedlicher Frequenz Verwendung fanden.

Um den Hörverlust Gehörgeschädigter soweit als möglich imitieren zu können, ist es notwendig, eine Filtereinstellung zu wählen, die der Hörschwellenkurve Gehörgeschädigter entspricht. Selbst eine optimale Einstellung darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, daß noch bedeutende Unterschiede zwischen simulierter und echter Schwerhörigkeit bestehen: das pathologische Recruitment, die einleitend genannten Veränderungen, sowie unbekannte Störungen der Informationsverarbeitung machen es unmöglich, die Charakteristik des geschädigten Ohres nachzuempfinden (s.a. GAY 1970). Dies bringt jedoch auch gewisse Vorteile mit sich: die Prüfung der Apparatur am gesunden Ohr mit entsprechender Filtereinstellung zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Methode, da hier Störungen des informationsverarbeitenden Apparates auszuschließen sind.

In der oben ausgeführten Weise wurde die Übertragungscharakteristik der verwendeten Filtereinstellungen bestimmt und die Werte in ein Audiogramm eingetragen (s. Abb.6.2).

Atlas - Audiogramm

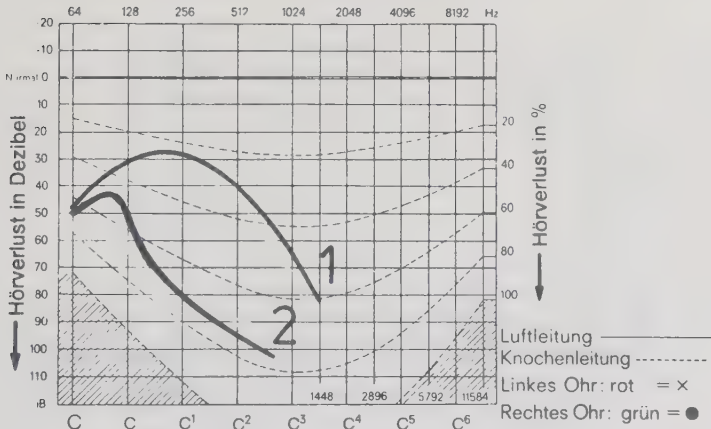


Abb. 6.2 Filtercharakteristik der verwendeten Einstellungen 1) 40 - 300 Hz und 20 - 600 Hz
2) 40 - 100 Hz und 40 - 100 Hz

Die Versuche wurden mit drei normalhörenden trainierten Versuchspersonen durchgeführt. Bei der gehörlosen Versuchsperson handelt es sich um ein 14jähriges Mädchen mit kombinierter Schalleitungs- und Innenohrschwerhörigkeit, die vor den protokollierten Versuchen 10 Durchläufe mitlesen konnte.

Atlas - Audiogramm

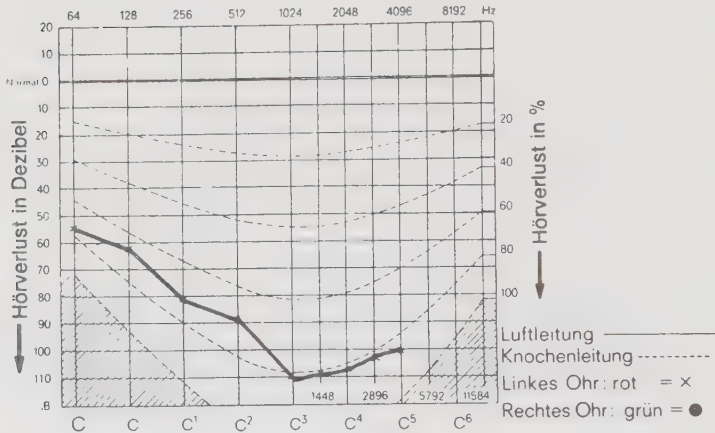


Abb. 6.3 Tonaudiogramm der gehörlosen Versuchsperson (♀ 14 J.) (beide Ohren hatten gleiche Hörschwellenkurven)

Ergebnisse:

Die Ergebnisse sind stark von Filterung und der Verstärkung abhängig. Im einzelnen ergeben sich folgende Werte:

Filtereinstellung	Untersetzung	Lautstärke	%
V 1 40-300 Hz	1 : 1	20 dB	59
20-600 Hz		40 dB	82
		60 dB	96

		2 : 1	20 dB	57
			60 dB	84
V 2	40-100 Hz		20 dB	45
	40-100 Hz	1 : 1	40 dB	60
		2 : 1	40 dB	36
			60 dB	35
V 3	80-100 Hz	2 : 1	60 dB	50
	80-100 Hz			

FINKENZELLER kam mit leicht veränderter Apparatur (siehe Seite 31) zu folgenden Ergebnissen (Filter : 80-300 Hz u. 80-300 Hz)..

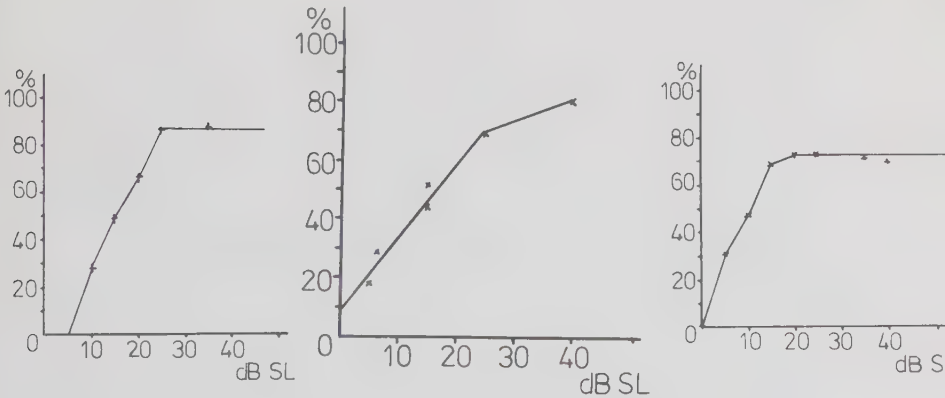


Abb. 7.1 Abhängigkeit der Verständlichkeit des Freiburger Zahlentests von der Lautstärke (dB) bei a) 1:1 b) 2:1 c) 3:1. Filtereinstellung: 80-300 Hz. u. 80-300 Hz.

Vergleich mit anderen Autoren

Über das Verständnis frequenzbeschnittener oder unter-setzter Sprache wurden eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt: MEYER und EPPLER 1950, FLETCHER 1953, KAINZ 1954, LIDEN und FANT 1954, HAHLBROCK 1957, SCHUBERT 1958, WINCKEL 1959, BERENDES und NIEMEYER 1960, TIFFANY und BENETT 1961, RAYMOND und PROUD 1962, MEHMKE 1964, OEKEN 1966, DANILOFF et. al. 1968, ENDRES 1969, GAY 1970, PICARD und BODE 1974 und viele andere. Ein Vergleich mit deren Ergebnissen ist jedoch nur bei gleichem Testmaterial sinnvoll, da dieses, wie oben besprochen, großen Einfluß auf die Verständlichkeit hat. OEKEN (1966) fand bei seiner stärksten Filterung, die alle Frequenzen bis 630 Hz abschnitt, bei Zahlen noch eine Verständlichkeit von über 80%. Diese Einstellung entspricht am ehesten unseren Versuchen mit Filtereinstellung von 40-300 Hz und 20-600 Hz. Bei 60 dB fanden wir jedoch 96% Verständlichkeit, ein Wert, der fast an die Normalverständlichkeit heranreicht. Der Unterschied dürfte durch die unterschiedlich trainierten Versuchspersonen bedingt sein. Während OEKEN "naive" Versuchspersonen benutzte, wurden die hier angegebenen Werte nach Training durch Mitlesen erreicht. Nach Berücksichtigung dieses Faktors lassen sich die Resultate durchaus in Einklang bringen.

Ein direkter Vergleich der Versuchsreihen mit unter-setzter Sprache ist nur bedingt möglich, da OEKEN auf eine Filterung verzichtete. Bei Untersetzung um eine Oktave ($\hat{=}$ 2 : 1) fand er bei Zahlen noch ca. 85% Verständlichkeit. Zur Gegenüberstellung wird unser Versuch mit der geringsten Filterung herangezogen (Einstellung : 40-300 Hz und 20-600 Hz). Der Wert von 84% entspricht demjenigen von OEKEN, doch sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß die Filterung als erschwerender Faktor berücksichtigt werden muß. Die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Werte lassen sich durch eine wahrscheinlich sehr viel kleinere Segmentzeit

(genaue Angaben fehlen) (siehe Seite 30), sowie durch die unterschiedlich trainierten Versuchspersonen erklären.

Diskussion der Ergebnisse

Fehlerhäufigkeit

Wenn man die Ergebnisse von Versuch 1 (40 - 300 Hz und 20 - 600 Hz) mit den auf Seite 21 (Abb. 3.3) gemachten Ausführungen vergleicht, mag es auf den ersten Blick überraschen, daß bei einer Steigerung der Lautstärke von 40 auf 60 dB die Verständlichkeit noch weiter zunimmt. Dieses Phänomen findet folgende Erklärung: durch die Verstärkung werden weitere Frequenzgebiete hörbar gemacht, die bei geringerer Lautstärke abgefiltert werden würden. Das so gewonnene Mehr an Information schlägt sich in dem besseren Resultat nieder. Anders verhält es sich jedoch bei Versuch 2. Hier bringt die Verstärkung von 40 auf 60 dB bei 2 : 1 keinen Vorteil. Die Ursache läßt sich aus der Abb. 6.2 ersehen: eine Verstärkung um 20 dB bringt, bedingt durch den steilen Filterverlauf kaum Informationsgewinn, sodaß ein Anstieg der Verständlichkeit ausbleibt.

Bei den eigenen Versuchen ist die Untersetzung von 2 : 1 der Verstärkung 1 : 1 immer unterlegen, eine Tatsache, die theoretisch bei starker Filterung nicht zu erwarten wäre. Von den auf Seite 8 bis 29 besprochenen Veränderungen im Tieftonbereich sind beide Versuchsreihen (1 : 1 und 2 : 1) bedingt durch die konstante Filtereinstellung gleichermaßen betroffen, sodaß sich die Untersetzung nur durch mehr Informationsgehalt unterscheiden sollte. Die starke Filterung bewirkt nämlich eine vollkommene Eliminierung der hohen Frequenzen und kompensiert den Abfall der Hörschwellenkurve im tiefen Frequenzbereich. Einzig veränderter Parameter wäre die Segmentzeit, deren Einfluß wie die

Versuche V 1 (bei 20 dB) zeigen, nicht allzu groß sein kann. Als Begründung bietet sich die veränderte Struktur der Laute an: der Gewinn an Information kann wegen der verzerrten Frequenzkonstellation nicht ausgenutzt werden. Gegen diese Theorie spricht der nahezu identische Wert von 1:1 und 2:1 in V1 bei 20 dB. Auch hier müßte die untersetzte Sprache wegen der veränderten Frequenzstruktur schlechter verstanden werden. Es muß also ein weiterer Parameter existieren, der die theoretisch möglichen Ergebnisse verhindert.

Dieses Problem wurde durch FINKENZELLER (1978) gelöst. Die Ergebnisse von V3, bei dem das als störend empfundene Rumpeln etwas abgefiltert wurde, und daraufhin die Verständlichkeit zunahm, ließen vermuten, daß das Ergebnis durch eine akustisch verbesserte Anlage und durch ein Abfiltern der informationsarmen tiefen Frequenzen erhöht werden kann. Die Untersuchungen von FINKENZELLER bestätigen diese Annahme: FINKENZELLER veränderte die Filtereinstellung auf zweimal 80-300 Hz und fand mit zunehmender Untersetzung ansteigende Verständlichkeit (Abb. 7.1). Auch die Abhängigkeit von der Lautstärke ist ideal: bis zu einer definierten Lautstärke erfolgt eine lineare Zunahme der Verständlichkeit, während sie bei darüber hinausgehender Verstärkung konstant bleibt.

Verwechslungsmatrices

Von Interesse ist es, die Fehler qualitativ zu betrachten. Dazu wurden die Einer herangezogen (siehe Diagramme Abb. 9.1)

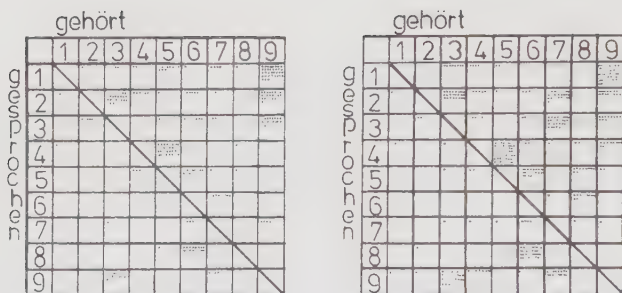


Abb. 9.1 Verwechslungsmatrices der Versuche V2 (40-100 Hz und 40-100 Hz); bei a) 1:1 und b) 2:1; mit Lautstärke $I = 40$ dB SL

Betrachtet man die Verwechslungsmatrix von V2 bei 1:1 und 2:1, so ist zu ersehen, daß in beiden Fällen dieselben Zahlen mißverstanden und mit den gleichen Zahlen verwechselt wurden. Die Untersetzung bringt hier also keine Vorteile. Besonders auffällig sind die Verwechslungen 1-9, 2-3, 9-3 und 4-5, auf die wir uns in unserer Betrachtung beschränken wollen. Aus dem ersten Paar kann geschlossen werden, daß der Diphthong "ei" von "eu" nicht zu unterscheiden und "s" am Ende von "1" nicht zu verstehen ist. Dies stimmt mit den Untersuchungen von OEKEN (1966) und FLETCHER (1953) überein, die bei Frequenzbeschnidung von "s" ein rasches Abnehmen der Verständlichkeit fanden. Ähnliches gilt für "z", das ebenfalls nicht erkannt wird, wie die Verwechslung 2-3 zeigt. Hier, wie bei 4-5, wäre "r" der Schlüssellaut zur Erkennung der Zahl. Die Tatsache der Verwechslung beweist,

daß auch dieser Laut nicht oder nur schlecht verstanden wird. Bei FLETCHER (1953) und OEKEN (1966) bleibt zwar sein Charakter bei Frequenzbeschneidung relativ lange erhalten, doch nimmt auch hier die Verständlichkeit bei starker Filterung (< 1000 Hz), in unserem Bereich also, ab. OEKEN (1966) fand für "f" eine sehr rasch abnehmende Verständniskurve bei Frequenzbeschneidung, eine Tatsache, die wir durch das Verwechslungspaar 4-5 nachweisen können. Mit unseren Untersuchungen können wir einen weiteren Befund OEKENS bestätigen. Er fand bei "ü" und "i" bei starker Filterung einen Wandel zu "u". Die fehlende Unterscheidbarkeit von 4 und 5 zeigt, daß kein Unterschied zwischen "ie" (in 4) und "ü" (in 5) gehört wurde. Die Verwechslung von 3 und 9 läßt sich durch oben Gesagtes sowie durch den raschen Verständnisabfall von "n" bei Filterung ab 2000 Hz (OEKEN 1966) weitgehend erklären.

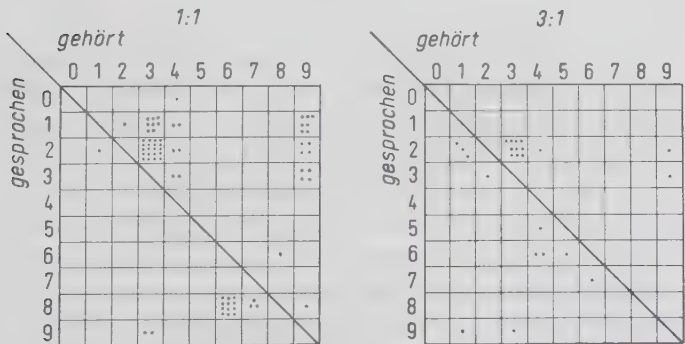


Abb. 9.2 Verwechslungsmatrices der Versuche von FINKENZELLER (80-300 Hz) ohne Berücksichtigung der Lautstärke a) 1:1, b) 3:1.

Die Betrachtung der Verwechslungsmatrices der Versuche von FINKENZELLER (1978) (Abb. 9.2) zeigt einen großen Unterschied zwischen den einzelnen Untersetzungen: während bei 1:1 2-3 und 1-9 sowie als neue Paare 1-3 und 8-6 häufig verwechselt wurden, findet man bei der Untersetzung 3:1 nur noch 2-3 als häufige Fehlerquelle. Diese Tendenz ist bereits bei der Testreihe V3 abzu- sehen (Material beim Autor einsehbar). Es bestätigt sich damit die aufgrund der quantitativen Ergebnisse aufgestellte Vermutung, daß bei entsprechender Filterung die Untersetzung Vorteile bei der Spracherkennung mit sich bringt, die sich in einer qualitativen Verbesserung niederschlägt. Als Begründung stehen uns nur Vermutungen zur Verfügung: neben dem subjektiv störenden Rumpeln der tiefen Frequenzen scheinen diese auch zu einer Störung des Gehörorgans zu führen ohne entsprechende Informationen mitzuliefern.

Erklärbar erscheint dagegen die bessere Verständlichkeit nach Abfilterung der tiefen Frequenzbereiche bei Unter- setzung, obwohl bei reiner Verstärkung (1:1) dasselbe Frequenzband abgefiltert wurde. Durch die Untersetzung werden vermehrt Sprachteile in den tieferen Frequenz- bereich transponiert, der Anteil an tiefen Frequenzen und damit der Anteil an informationsarmen, jedoch störenden Frequenzbändern nimmt zu.

Ein kurzer Blick auf die Verständlichkeit der Zahlen im Normaltest (BRINKMANN 1974) zeigt uns, daß sich das Bild vollkommen geändert hat: 13 und 19 sind hier die bestverstandenen Zahlen, während gerade diese in unseren Versuchsreihen besonders häufig verwechselt wurden. Umgekehrt erreicht 80 relativ hohe Verständ- lichkeit in unserem Versuch, im Gegensatz zu BRINKMANN.

Zusammenfassend läßt sich sagen: bei starker Filterung der hohen und Abfilterung der sehr niederfrequenten Sprachanteile zeigt die Untersetzung gegenüber reiner Verstärkung Vorteile. Diese sind jedoch nur bei oben genannter Einstellung zu finden, da schwächere Filterung zum einen informationstragende höhere Frequenzen zuläßt, und die Problematik des starken Schwellenabfalles hinzukommt, zum anderen die sehr niederfrequenten Bereiche die Informations- und Verarbeitungskapazität des Organs stören und überfordern.

Ergebnisse bei gehörgeschädigten Versuchspersonen

Bei den Versuchen mit der gehörgeschädigten Versuchsperson wurde auf die schallgedämpfte Kammer verzichtet, die Tests fanden in ruhiger Umgebung (Geräuschpegel max. 30 dB) statt. Die Versuchsperson konnte sich die Lautstärke selbst wählen; die Übertragung erfolgte mit Kopfhörern. Eine Filterung wurde nicht vorgenommen. Dabei wurden folgende Resultate erzielt:

V 4	1:1	11%
V 5	2:1	18%

Dazu sind noch folgende Erklärungen nötig: die Versuchsperson war durch den Gebrauch der Kopfhörer im Unter-richt an verstärkte Sprache gewöhnt, was sich an der ge-ringen Schwankungsbreite der Ergebnisse bemerkbar machte. Demgegenüber war die Streuung bei 2:1 relativ groß (max. 27% min. 8%).

Vergleich mit anderen Autoren

Ein Vergleich mit anderen Autoren ist nur mit starkem Vorbehalt möglich, da zwar Untersuchungen mit gehörgeschädigten Versuchspersonen vorliegen (GENGEL 1973, OEKEN 1976), diese Untersuchungen jedoch mit anderem Testmaterial durchgeführt wurden. OEKEN (1966) fand mit Sprache immer Vorteile bei reiner Verstärkung, auch nach längerem Training. Die Ursache könnte, in dem, ver-glichen mit unseren Versuchspersonen, geringen Hörver-lust von 50 dB bei 1500 Hz liegen, da hier bei ent-sprechender Verstärkung noch höherfrequente Anteile als Informationsträger dienen können. Dies ist bei unserer Versuchsperson mit einem Hörverlust von 110 dB bei 1024 Hz nicht mehr möglich. Bei der benutzten Verstärkung

von ca. 90 dB werden Frequenzen nur bis etwa 350 Hz wahrgenommen. Dieser Hörverlust entspricht in etwa der Filtereinstellung $2 \times 40 - 100$ Hz , da hier bei 400 Hz eine Abschwächung um 96 dB vorliegt.

Interpretation der Ergebnisse

Wenn, wie eben erwähnt, die Filtereinstellung $2 \times 40 - 100$ Hz etwa dem Gehörverlust der gehörgeschädigten Versuchsperson gleichkommt, stellt sich die Frage, warum die Untersetzung bei dieser Testreihe überlegen ist, während sie bei Normalhörenden hinter den Ergebnissen der reinen Verstärkung zurückbleibt.

Dafür bieten sich zwei Gründe an: 1. fehlt bei den Gehörlosen der leichte Anstieg der Hörschwellenkurve zwischen 60 und 120 Hz und 2. spielen bei Normalhörenden vermutlich die erlernten Frequenzmuster auch im abgefilterten Bereich entgegen vorher geäußerten Vermutungen eine gewisse Rolle, sodaß es dadurch zu einer Beeinflussung der Resultate kommt. Diese angelernten Muster spielen bei Gehörgeschädigten keine Rolle. Durch die Verwechslungsmatrices läßt sich diese Theorie erhärten (siehe Abb. 9.1, 12.1). Die Verwechslungen bei V4 und V5 scheinen zufälliger, ohne die typischen Verwechslungspaare. Während Normalhörende ein Klangbild sofort mit ihrer akustischen Erinnerung vergleichen, und entsprechend immer gleich fehlinterpretieren, ist dies bei Versuchspersonen ohne akustische Erfahrung nicht der Fall (siehe Diagramme Abb. 12.1.a und 12.1.b)

Auffällig ist die häufige Nennung von "7", ohne daß hier eine schlüssige Begründung gegeben werden kann (Abb. 12.1.a. und 12.1.b).

gehört									
Versuch	1	2	3	4	5	6	7	8	9

gehört									
Versuch	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Abb. 12.1 Verwechslungsmatrices der Versuche V4 und V5 der gehörgeschädigten Versuchsperson
a) 1:1 (V4) b) 2:1 (V5)

Um den oben gezogenen Vergleich der Resultate vornehmen zu können, muß gewährleistet sein, daß die Versuche mit gleicher Lautstärke über Schwelle gehört wurden. Dazu wurde bei den normalhörenden Versuchspersonen die Lautstärke des Sinustons von 125 Hz am Anfang des Freiburger Zahlentests bestimmt. Bei der Filtereinstellung von 2 x 40 - 100 Hz fanden sich 40 dB. Vergleicht man diesen Wert mit der Hörschwelle unserer gehörgeschädigten Versuchsperson, so zeigt sich, daß diese um ca. 90 dB angehoben ist, also eine Verstärkung von 90 dB vorgenommen werden muß, um die selbe Lautheit zu erreichen. Dieser Wert entspricht unserer oben angegebenen Verstärkung, sodaß sich die Lautheiten der Versuche entsprechen.

Abschließende Betrachtung

Die Ergebnisse geben zu gewisser Hoffnung, wenn auch nicht zu Euphorie Anlaß. Trotz aller positiven Resultate darf nicht übersehen werden, daß es sich bei dem verwendeten Testmaterial um die einfachste Sprachprüfung handelt, bei der die Ergebnisse besonders durch Normalhörende bei geschicktem Kombinieren richtig erraten werden können. Das Erkennen einer Zahl reduziert sich häufig auf die Erkennung zweier Laute, die zum Verständnis von Normalsprache bei weitem nicht ausreichen.

Eine optimale Möglichkeit zu finden, Sprache in für Gehörgeschädigte hörbare Frequenzbereiche zu übertragen, wird solange dem Zufall überlassen bleiben, bis die zur Erkennung von Lauten nötige Struktur erforscht ist. Auch durch diese Arbeit wurde bestätigt, daß sowohl die Theorie der absoluten (HERMANN 1890, STUMPF 1926), als auch der relativen Formantlage (POTTER - STEINBERG 1913, TIFFANY und BENNETT 1961) nicht haltbar ist. Auch das von NESSEL (1960) postulierte Amplitudenverhältnis der Formanten zueinander kann nicht der allein entscheidende Faktor sein. Die Theorie von KAINZ und FANT (KAINZ 1954, FANT 1948), die den benachbarten Lauten neben dem eigenen Frequenzaufbau eine wichtige Rolle zuteilen würde, wurde durch die Untersuchung von GAY (1970) relativiert.

Vielleicht bieten die Untersuchungen von SLOWSONS (1976), der bei unterschiedlicher Transposition der Formanten eine bessere Verständlichkeit für Vokale fand als bei gleicher Verschiebung der beiden Formantgebiete, einen

neuen Ansatzpunkt. Denkbar wäre eine "Aufsplitterung" des gesamten Frequenzbereiches im Kammfilterverfahren mit anschließender unterschiedlicher Untersetzung und Verstärkung.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- 1.) Beasley,D.S., Mosher,N.L., Orchik,D.J.: Use of Frequency-Shifted Time-Compressed Speech with Hearing-Impaired Children.
Audiology 15, 395 (1976)
- 2.) Bennett,D.N., Beyers,V.W.: Increases Intelligibility in the Hypacoustic by Slow Played Frequency Transposition.
J. Audiol. Res. 7, 107 (1967)
- 3.) Berendes,J. Niemeyer,W.: Audiometrie, Schwerhörigkeit und Hörgerätewirkung.
J.F. Lehmann Verlag, München 1960
- 4.) Brinkmann,K.: Die Neuaufnahme der Wörter für Gehörprüfung mit Sprache.
Zeitschrift für Hörgeräteakustik 13, 12 (1974)
- 5.) Cardazo,B.Z.: Frequencydiscrimination at the Threshold.
Communication and Cybernetics 8, 164
- 6.) Chih-ai,L., Christovich,L.A.: Frequency Difference Limens as a Function of Tonal Duration.
Sou.Phys.-Acoust. 6 (1975)
- 7.) Daniloff,R.G.,Shriner,T.H., Zemlin,W.R.: Intelligibility of Vowels Altered in Duration and Frequency.
J.Acoust.Soc.Am. 44, 700 (1968)
- 8.) Endres,W. : Untersuchungen zur Einengung des Frequenzbandes für die Sprachübertragung.
Acustica 21, 125 (1969)
- 9.) Endres,W. : Über die Größe des "weitschweifigen" Anteils der Sprache.
Fernmeldetechn. Z. 8, 89 (1955)
- 10.) Fant,G. : International Report.
L.M. Ericsson, Stockholm 1948
- 11.) McFadden,D.: Duration-Intensity Reciprocity for Equal Loudness.
J.Acoust.Soc.Am. 57, 702 (1975)

- 12.) Feldtkeller,T., Zwicker,E.: Das Ohr als Nachrichten-
empfänger.
Hirzel Verlag, Stuttgart 1956
- 13.) Finkenzeller,P.:Hypothese zur Schallcodierung des Innen-
ohres.
Habilitationsschrift, Erlangen 1973
- 14.) Finkenzeller,P.: Recent Status of Auditory Information
Processing for Artificial Stimulation of
the Ear.
Fifth Biennial International Symposium
(IERASG), Jerusalem 1977
- 15.) Finkenzeller,P., Keidel,W.S.: The Intelligibility of Fre-
quency Transposed Speech.
13. International Congress of Audiology,
Florenz 1976
- 16.) Finkenzeller,P.: Auditory Prothesis, a Challenge for
Neurophysiology.
Second Round Table: "Auditory Rehabilitation:
Physiological and Technological Aspects"
14. International Congress of Audiology,
Acapulco 1978
- 17.) Fletcher,H.: Speech and Hearing
New York 1953
- 18.) Fujimura,O.: Syllabs as a Unit of Speech Recognition.
IEEE Trans.Acoust. Signal Process ASSP-
23 No.1, 82 (1975)
- 19.) Gay,T.H. : Effects of Filterung and Vowel Environment
on Consonant Perception.
J.Acoust.Soc.Am. 48, 993 (1970)
- 20.) Gengel,R.W.: Temporal Effects in Frequency Discrimination
by Hearing-Impaired Listeners.
J.Acoust. 54, 11 (1973)
- 21.) Grützner,P.: Stimme und Sprache. Ergebnisse der Physiologie
von Ascher und Spiro I, Band II. 1902
- 22.) Guberina,P.: Verbotonal Method and its Application of
the Deaf. Report for the Proceedings of
the International Congress on Education
of the Deaf.
U.S. Government Printing Office, Washington 1964
- 23.) Gulick,W.L.: Hearing. Physiology and Psychophysics.
Oxford University Press, New York 1971

- 24.) Hahlbrock, K.H.: Sprachaudiometrie.
Thieme Verlag, Stuttgart 1957
- 25.) Hermann, L.:
Arch. Physiol. 47, 42 (1890)
- 26.) Jensen, J.P.: Physical Analysis of Linguistic Vowel
Duration.
J. Acoust. Soc. Am. 52, 708 (1972)
- 27.) Johansson, B.: The Use of the Transposer for the Manage-
ment of the Deaf Child.
Int. Audiol. 5, 362
- 28.) Kainz, F.: Psychologie der Sprache.
Ehmkke Verlag, Stuttgart 1954
- 29.) Keidel, W.D.: Vibrationsreception. Der Erschütterungs-
sinn des Menschen.
Erlanger Forschungen, Reihe B, Band 2
Erlangen 1956
- 30.) Keidel, W.D.: Note on a New System for Vibratory
Communication.
Perceptual and Motor Skills 8, 250 (1958)
- 31.) Keidel, W.D.: Electrophysiology of Vibratory Reception. In:
Contributions of Sensory Physiology Vol. 3
Academic Press, New York 1968
- 32.) Keidel, W.D.: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie.
Thieme Verlag, Stuttgart 1973 (a)
- 33.) Keidel, W.D.: The Cochlear Model in Skin Stimulation.
Conference on Cutaneous Communication
Systems and Devices.
Monterey California 1973 (b)
- 34.) Keidel, W.D.: Vibration and Combined Stresses in Ad-
vanced Systems. In:
AGARD Conference Proceedings No. 145, 1974
- 35.) König, G., Eichler, H.: Ein neues Verfahren zur Hörverbes-
serung bei hochgradiger Perzeptionsschwer-
hörigkeit durch Hörapparate.
Arch. Ohr-Nas.-u. Kehlk. Heilk. 165, 326 (1954)
- 36.) Langenbeck, B.: Lehrbuch der praktischen Audiometrie.
Thieme Verlag, Stuttgart 1963
- 37.) Liden, G., Fant, G.:
Acta Oto-Laryng. Suppl. 116, 189 (Stockholm) (1954)

- 38.) Ling,D., Druz,W.: Transposition of High Frequency Sounds by Vocoding of the Speech Spectrum: Its Use by Deaf Children. J.Audiol.Res. 7, 133 (1967)
- 39.) Mehmke,S.: Hörverbesserung durch Frequenztransposition. Z.f. Hörgeräteakustik 3, 71 (1964)
- 40.) Meyer-Eppler,W.: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Kommunikation und Kybernetik in Einzeldarstellungen. Band 1 Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1959
- 41.) Nessel,E.: Acta Oto-Laryng. Suppl. 157, (Stockholm) (1960)
- 42.) Noteboom,S.G.: Time in Speech Reception. IPO. Ann.Prog.Rep. No.9, 39 (1974)
- 43.) Oeken,F.W.: Frequenztransposition zur Hörverbesserung. Verlag Ambrosius Barth, Leipzig 1966
- 44.) Oettinger,R.: Grenzen der Hörbarkeit von Frequenz- und Tonzahlveränderungen bei Tonimpulsen. Acustica 4, 30 (1959)
- 45.) Perwitzschky,E.: Ein neues Prinzip zur Hörverbesserung. Z.f. Hals-,Nasen- und Ohrenheilk. 12, 593 (1925)
- 46.) Picard,M., Bode,D.L.: Slow Played Speech with and without Time Restoration. A Phonetic Analysis. J.Acoust.Soc.Am. 55, 461 (1974)
- 47.) Pickett,J.M., Martony,J.: Low Frequency Vowel Formant Discrimination in Hearing-Impaired Listeners. J.Speech.Hear.Res. 13, 347 (1970)
- 48.) Potter, Steinberg: zit. bei Oeken,F.W.
- 49.) Powers,G.L., Speaks,C.: Intelligibility of Temporal Interrupted Speech. J.Acoust.Soc.Am. 54, 661 (1973)
- 50.) Raymond,T.H., Proud,G.O.: Audiofrequency Conversion. Arch. of Otolaryngology 76, 436 (1962)

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Wolf
D. K e i d e l für die Bereitstellung der Arbeits-
möglichkeiten.

Herzlichst bedanken möchte ich mich ferner bei Herrn
Prof. Dr. rer.nat. Peter F i n k e n z e l l e r
für die Stellung des Themas und die vielfältigen
Anregungen und Unterstützungen bei der Fertigstellung
dieser Arbeit.

Mein Dank gilt auch Herrn K. B u r i a n für die
exakte Ausführung der Photoarbeiten.

L e b e n s l a u f

Ich, Emil Rudolf, wurde am 27. September 1953 als zweiter Sohn der Tierarztes Dr. Emil Rudolf und seiner Frau Irmen-gard in Dorfen, Kreis Erding, geboren. 1959 trat ich in die hiesige Volksschule ein und wechselte 1963, nach einem Jahr im Volksschulinternat Algasing, auf das mathematisch naturwissenschaftliche Gymnasium Erding über. Dort legte ich im Mai 1972 die Reifeprüfung ab. Im WS 1972/73 begann ich das Studium der Humanmedizin an der Justus Liebig Universität Gießen, das ich ab dem WS 1973/74 an der Friedrich Alexander Universität Erlangen fortsetzte. Nach der Ausbildung in Chirurgie und Innerer Medizin am Stadtkrankenhaus Hof sowie in Gynäkologie an der Universitätsfrauenklinik Erlangen im Rahmen des Praktischen Jahres, legte ich im Mai 1979 das Staatsexamen in Erlan-gen ab.

Emil Rudolf

Copy-Center 2000

852 ERLANGEN · Obere Karlstr. 30
Tel. 09131-26197